

# Sistema de medición y control de concentración de oxígeno disuelto para fermentaciones aeróbicas

Manuel Alvarez Icaza y Alfonso Macías López

Centro de Instrumentos, UNAM  
Ap. Postal 70-186,  
México 20, D.F.

## RESUMEN

Se describen las características principales y consideraciones de diseño de un sistema de medición y control de la concentración de oxígeno disuelto para fermentaciones aeróbicas. El prototipo del sistema diseñado y construido en su totalidad en el Centro de Instrumentos de la UNAM permite regular el contenido de oxígeno disuelto dentro de un rango de  $\pm 2\%$  del valor de referencia. Una característica importante del mismo es la sencillez del electrodo sensor de oxígeno.

## ABSTRACT

The main features and design considerations of a system for the measurement and control of dissolved oxygen concentration, in aerobic fermentation processes, are described. The system's prototype was designed and constructed entirely at the Centro de Instrumentos, UNAM. It allows for a  $\pm 2\%$  regulation of the dissolved oxygen contents. A main feature of the system is the simplicity of the oxygen sensing electrode.

## I. Introducción

Los procesos de fermentación aeróbica tienen gran importancia en industrias tales como la farmacéutica y la de producción de alimentos. En estos procesos, la medición del contenido de oxígeno disuelto es fundamental, puesto que del valor de este parámetro depende en gran medida el buen desarrollo de los mismos.

La tecnología involucrada en los sistemas comerciales de origen extranjero para la medición y control de la cantidad de oxígeno disuelto es bien conocida. Dada la importancia comercial de las industrias antes mencionadas, se decidió atacar el problema y diseñar un sistema que se adaptara a las condiciones del mercado nacional, tanto en lo referente al usuario como a la disponibilidad de los componentes y los procesos de fabricación.

El prototipo del sistema desarrollado en el Centro de Instrumentos de la UNAM consta de

cuatro componentes principales (véase diagrama a bloques de la Figura 1):

- Electrodo sensor de oxígeno.
- Sistema de amplificación.
- Control de contenido de oxígeno.
- Control de velocidad del agitador mecánico.

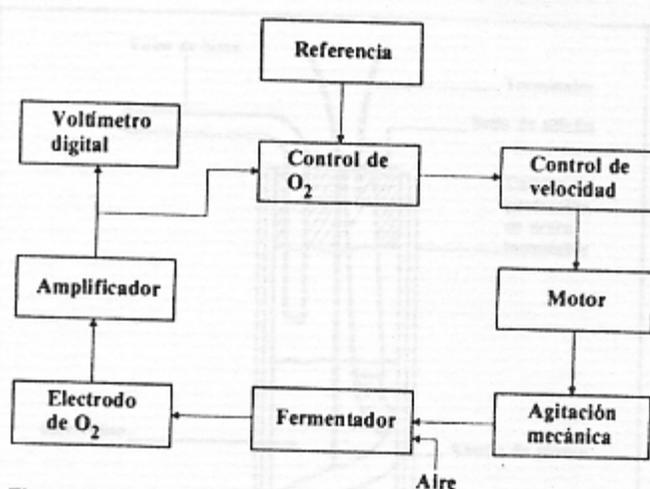


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema de medición y control de oxígeno disuelto para procesos de fermentación aeróbica.

Describiremos en el orden anterior cada uno de los componentes del sistema y finalizaremos con las conclusiones.

## II. Electrodo sensor de oxígeno

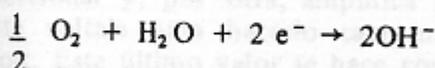
El electrodo sensor de oxígeno que se muestra de manera esquemática en la Figura 2 está compuesto esencialmente de 5 partes:

- Anodo de plomo.
- Cátodo de plata.
- Membrana.
- Un electrolito hecho a base de ácido acético.

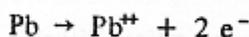
e) Camisa de protección.

La operación del electrodo depende de una reacción electroquímica en la que tiene lugar la reducción del oxígeno; así, se produce una corriente eléctrica cuya magnitud es proporcional a la actividad del oxígeno disuelto o a su presión parcial.

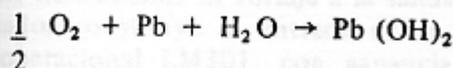
La reacción que tiene lugar en el cátodo de plata es la propuesta por Mackereth.<sup>1</sup>



Mientras que el ánodo de plomo se oxida perdiendo dos electrones:



Combinando las dos reacciones anteriores se obtiene:



La expresión teórica para la magnitud de la corriente producida  $I$ , está dada por:

$$I = nFA \frac{P_m}{b} \text{PPO}_2$$

en donde  $n$  es el número de electrones transferidos;  $F$  la constante de Faraday;  $A$  el área del cátodo de plata;  $P_m$  el coeficiente de permeabilidad de la membrana;  $b$  el espesor de la membrana y  $\text{PPO}_2$  es la presión parcial del oxígeno en la muestra.

La corriente  $I$  depende también de la temperatura según una ley de variación exponencial.

$$I = A e^{-J/T}$$

en donde  $A$  y  $J$  son constantes que dependen de las dimensiones de la celda del electrodo y  $T$  es el valor de la temperatura absoluta.

En la forma actual del sensor de oxígeno (Figura 3), el ánodo y el cátodo están contenidos dentro de un tubo de vidrio de 8 mm de diámetro y 1 mm de espesor. El ánodo de plomo debe tener la máxima área posible, y es por ello que tiene forma de espiral. El cátodo de plata tiene también forma espiral con una pequeña curvatura para facilitar el contacto con la membrana que cierra al tubo; esta última está hecha

de teflón de 25  $\mu\text{m}$  de espesor y permanece en contacto con la muestra. El electrolito hecho a base de ácido acético debe llegar a un nivel de 2 cm, por encima de donde termina el ánodo. Por el otro extremo del tubo de vidrio salen los conductores del cátodo y ánodo, así como dos tubos de látex que permiten cargar el electrolito. El conjunto se sella por medio de silicón.

Dadas las turbulencias que se crean bajo las condiciones normales de operación del fermentador, es necesario proporcionar protección mecánica al electrodo, lo que se logra cubriéndolo con una camisa hecha de un tubo de acero inoxidable, al cual se le hace con el torno una montura adecuada.

Los electrodos construidos según este esquema han dado buenos resultados. La meta que se desea alcanzar en el futuro es que la membrana sea intercambiable.

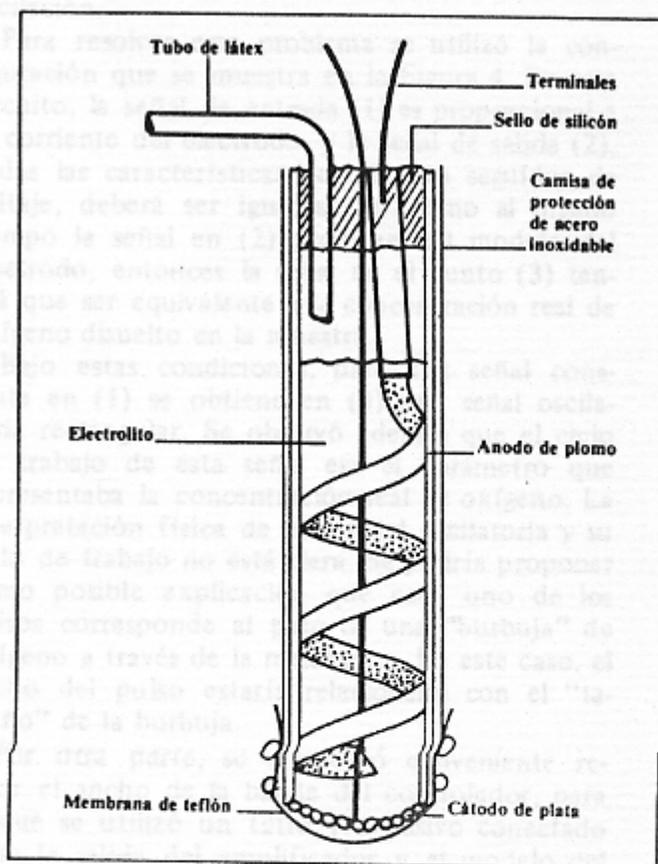


Figura 2. Diagrama esquemático de los elementos constitutivos del electrodo sensor de oxígeno.

### III. Sistema de amplificación

Como se explicó en el inciso anterior, el electrodo sensor de oxígeno proporciona como señal de salida una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de oxígeno disuelto. La función del sistema de amplificación es doble: por una parte, convierte esta señal de corriente en una señal de voltaje proporcional y, por otra, amplifica propiamente este voltaje para hacerlo caer en el rango 0-1 Volt. Este último valor se hace corresponder con la deflexión de escala completa del instrumento, por lo que es necesario que la ganancia del sistema de amplificación sea variable, para permitir ajustar diversas condiciones de operación.

El sistema de amplificación consta de un preamplificador (LM321A) diseñado en una configuración tal que presente una impedancia de entrada de  $1K\Omega$ , a través de la cual circula la corriente del transductor. El voltaje a la salida del preamplificador constituye la entrada de un amplificador operacional LM301, con ganancia variable. El resultado global es un sistema de amplificación inversor con impedancia de entrada de  $1K\Omega$  y ganancia ajustable entre 100 y 200.

Es conveniente mencionar que el sistema de amplificación propuesto posee las características de estabilidad térmica necesarias para esta aplicación. La posibilidad de diseñar el preamplificador para presentar una baja impedancia de entrada permite aprovechar sus excelentes características de estabilidad térmica nominal, que es de  $1 \mu V/^{\circ}C^2$ .

### IV. Control del contenido de oxígeno

La cantidad de oxígeno disuelto en la muestra se controla variando la velocidad de rotación de un agitador mecánico. En esta sección describiremos la estructura del controlador del contenido de oxígeno, el cual permite obtener una señal óptica para accionar el agitador.

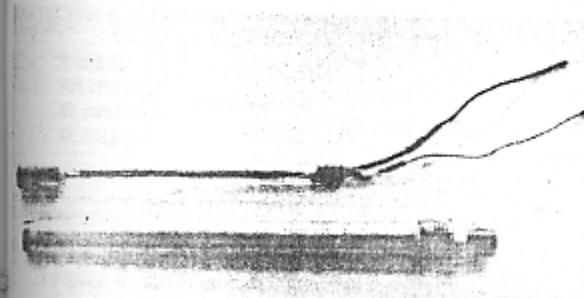


Figura 3. Electrodo sensor de oxígeno (sin camisa de protección) mostrando el ánodo de plomo y el cátodo de plata.

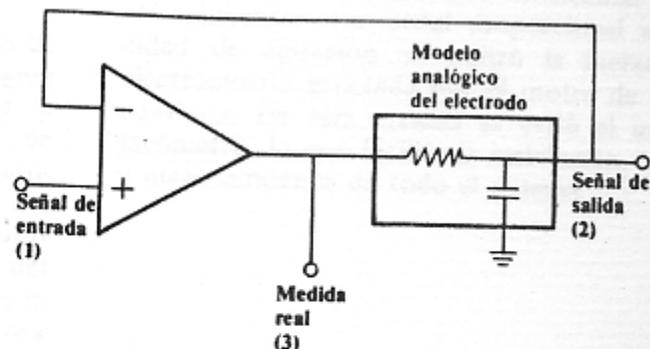


Figura 4. Sistema para estimar el contenido real de oxígeno disuelto con base en la señal de entrada proveniente del electrodo sensor de oxígeno (véase texto).

En pruebas de laboratorio se observó que la respuesta a escalón del electrodo de oxígeno correspondía, de manera aproximada, a la de un sistema de primer orden que podía ser modelado por medio de un circuito RC simple. Bajo estas condiciones, la señal proveniente del sistema de amplificación no puede ser utilizada directamente para constituir un sistema de control del tipo proporcional, ya que se produciría sobretiro y oscilación.

Para resolver este problema se utilizó la configuración que se muestra en la Figura 4. En este circuito, la señal de entrada (1) es proporcional a la corriente del electrodo, y la señal de salida (2), dadas las características del circuito seguidor de voltaje, deberá ser igual a (1). Como al mismo tiempo la señal en (2) proviene del modelo del electrodo, entonces la señal en el punto (3) tendrá que ser equivalente a la concentración real de oxígeno disuelto en la muestra.

Bajo estas condiciones, para una señal constante en (1) se obtiene en (3) una señal oscilatoria rectangular. Se observó además que el ciclo de trabajo de esta señal era el parámetro que representaba la concentración real de oxígeno. La interpretación física de esta señal oscilatoria y su ciclo de trabajo no está clara. Se podría proponer como posible explicación que cada uno de los pulsos corresponde al paso de una "burbuja" de oxígeno a través de la membrana. En este caso, el ancho del pulso estaría relacionado con el "tamaño" de la burbuja.

Por otra parte, se consideró conveniente reducir el ancho de la banda del controlador, para lo que se utilizó un filtro RC pasivo conectado entre la salida del amplificador y el modelo del electrodo. La salida del circuito así constituido ya puede ser utilizada para alimentar una de las entradas del amplificador de error, cuya otra entrada es la señal de referencia (Figura 5).

## V. Control de velocidad de agitación

El diagrama de bloques del sistema de control de la velocidad de agitación se muestra en la Figura 6. Este sistema debe ser capaz de manejar la potencia necesaria para alimentar al motor de corriente directa del agitador. La potencia suministrada debe ser función tanto de la señal del voltaje de control, obtenida a partir del circuito de la Figura 5, como de la velocidad misma del agitador. Para controlar la potencia suministrada al motor se decidió hacer uso de la señal de línea rectificadora y variar el ciclo de trabajo mediante un rectificador controlado de silicio (SCR), siendo éste último el componente fundamental del paso de fuerza de la Figura 6.

La señal de disparo para el SCR se obtiene a partir de un retardo adecuado de los pulsos sincronizados con el inicio de cada ciclo del voltaje de línea. Este retardo es función tanto de la señal de control como de la velocidad del motor.

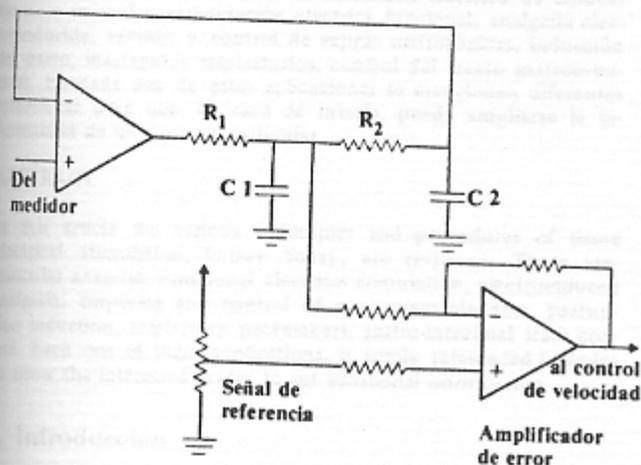


Figura 5. Configuración general del sistema de control del contenido de oxígeno (para explicación véase texto).

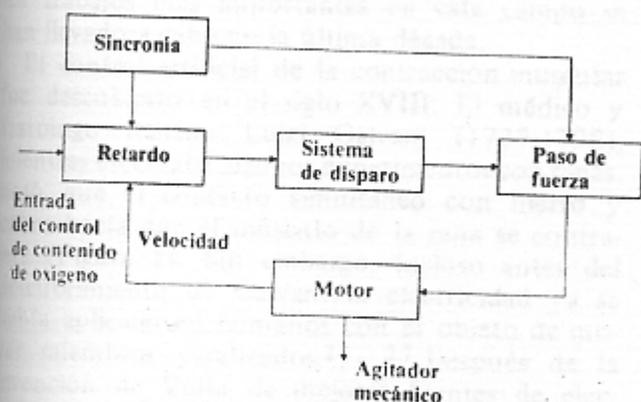


Figura 6. Diagrama a bloques del sistema de control de la velocidad de agitación.

Finalmente, es importante mencionar que para retroalimentar una señal proporcional a la velocidad de agitación se utilizó la fuerza contraelectromotriz generada por el motor de corriente continua. De esta manera se evitó el uso de un tacómetro, lo que facilita la instalación, operación y mantenimiento de todo el sistema.

## VI. Conclusiones

En este trabajo se han descrito las características principales del prototipo de un sistema de medición y control de oxígeno disuelto (Figura 7) diseñado y construido en su totalidad en el Centro de Instrumentos de la UNAM. Con el sistema en su estado actual es posible controlar la cantidad de oxígeno disuelto dentro de un rango de  $\pm 2\%$  del nivel de referencia.

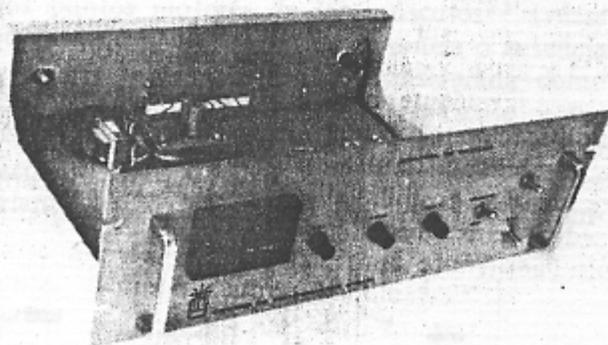


Figura 7. Vista general del prototipo del sistema de medición y control de oxígeno disuelto para procesos de fermentación aeróbica.

Actualmente se sigue trabajando para llegar a la construcción de electrodos con membrana intercambiable; se pasará después a la etapa de fabricación de los sistemas a escala industrial.

## REFERENCIAS

1. Mackereth, F.J.H., *J. Sci. Instrum.*, V. 41, 1964, pp. 38.
2. *Linear Data book*, National Semiconductors.